

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra energetiky**

**Návrh výměníku pro využití spalin z krokové  
pece ve VÚHŽ Dobrá**

*Heat Exchanger Project for Combustion Gasses*

*Heat Utilisation of Walking Beam Furnace*

*in VÚHŽ Dobrá*

Student

**Ondřej Baron**

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Zdeněk Kadlec, Ph.D.**

Ostrava 2015

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Baron**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení  
Téma: **Návrh výměníku pro využití spalin z krokové pece ve VUHŽ Dobrá**  
**Heat Exchanger Project for Combustion Gasses Heat Utilisation of**  
**Walking Beam Furnace in VÚHŽ Dobrá**

Zásady pro vypracování:

- stechiometrický výpočet spalin
- výpočet teplosměnných ploch výměníku
- návrh výměníku a jeho umístění

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1]BLAHOŽ, V., KADLEC, Z. *Základy sdílení tepla*. 2.vyd. Ostrava: SPBI Spectrum, 2000. 110 s. ISBN 80-902001-1-7  
[2]ČERNÝ, V., JANEBA, B., TEYSSLER, J. *Parní kotle*. Praha 1 : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. Teoretické základy spalování, s. 864.  
[3]KADLEC, Z. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. Ostrava: SPBI Spectrum, 2009. 100 s. ISBN 978-80-7385-061-6  
[4]DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Praha: Česka technika, nakladatelství ČVUT, 1999. 978-80-01-03757-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Zdeněk Kadlec, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. 5. 2013

O. Bor  
podpis studenta

## Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly

VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. 5. 2015



podpis studenta

**Jméno a příjmení autora práce: Ondřej Baron**

**Adresa trvalého pobytu autora práce:**

**Ostravice 616**

**738 14 Ostravice**

## Anotace

Baron, O. *Návrh výměníku pro využití spalin z krokové pece ve VÚHŽ Dobrá: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2015, 47s. Bakalářská práce, vedoucí: doc. Ing. Zdeněk Kadlec, Ph.D.

Předmětem této bakalářské práce je návrh tepelného výměníku pro využití odpadního tepla spalin z krokové pece ve VÚHŽ a.s. Dobrá. V úvodní části jsou vysvětleny důvody využívání druhotných energetických zdrojů a představení společnosti VÚHŽ a.s. Část druhá je věnována jednotlivým typům výměníků tepla, způsobům přestupu tepla a použití výměníků. V části poslední je proveden stechiometrický výpočet spalin, teplosměnné plochy výměníku a následný návrh akumulční nádrže, rozměrů a použití spalinového výměníku.

## Annotation

Baron, O. *Heat Exchanger Project for Combustion Gasses Heat Utilisation of Walking Beam Furnace in VÚHŽ Dobrá: bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2015, 47p, Thesis head: doc. Ing. Zdeněk Kadlec, Ph.D.

The subject of this thesis is the design of the heat exchanger for heat recovery from flue gas from the walking beam furnace at VÚHŽ a.s. Dobrá. In the first part explains the reasons for the use of secondary energy resources and performance of VÚHŽ a.s. Company. The second part is dedicated to the different types of heat exchangers, heat transfer methods and the use of heat exchangers. In the final calculation is made stoichiometric flue gas, heat exchange surface of the exchanger and the subsequent design of storage tank, dimensions and use of flue gas heat exchanger.

**Klíčová slova:** odpadní teplo, výměník, teplá užitková voda, akumulční nádrž

**Keywords:** waste head, exchanger, heating supply water, storage tank

## **Poděkování**

Rád bych touto formou poděkoval všem, kteří mi pomáhali při psaní mé bakalářské práce. Především mé díky patří doc. Ing. Zdeňku Kadlecovi, Ph.D. za průběžné vedení, cenné rady a zkušenosti z praxe při návrhu výměníku. Rovněž děkuji Ing. Oldřichu Koláříkovi a Ing. Zbyňku Szeligovi Ph.D. za pomoc při aplikaci bilančních výpočtů spalin a výměníku.

# Obsah

<b>Seznam použitých veličin a symbolů .....</b>	<b>9</b>
<b>1. Úvod.....</b>	<b>12</b>
<b>2. Technologie a technický potenciál využití odpadního tepla.....</b>	<b>13</b>
2.1 Ohled na životní prostředí.....	13
2.2 Potenciál využití odpadního tepla.....	13
2.3 Podmínky využívání odpadního tepla spalin .....	14
2.4 Důvody využití druhotných energetických zdrojů.....	14
<b>3. Výzkumný ústav hutnictví železa a.s. ....</b>	<b>15</b>
<b>4. Kroková pec.....</b>	<b>16</b>
<b>5. Výměníky tepla.....</b>	<b>18</b>
5.1 Základní dělení .....	18
5.1.1 Rozdělení výměníků podle způsobu přenosu tepla .....	19
5.1.2 Rozdělení výměníků podle účelu a použití.....	19
5.1.3 Rozdělení výměníků podle toku média.....	19
5.2 Trubkové výměníky tepla .....	20
5.2.1 Dvoutrubkový výměník .....	21
5.2.2 Shell & Tube – kotlové .....	22
5.3 Deskové výměníky .....	23
5.3.1 Deska v rámu .....	24
5.3.2 Spirálové výměníky.....	25
5.3.3 Deskožebrové kompaktní výměníky .....	26
5.4 Ljungström regenerační výměník .....	26
<b>6. Návrh tepelného výměníku.....</b>	<b>28</b>
6.1 Stechiometrie .....	28
6.2 Výkon výměníku.....	31
6.2.1 Tepelná bilance pro spaliny .....	33

6.2.2	<i>Tepelná bilance pro vodu</i> .....	35
6.3	Výpočet základních parametrů výměníku .....	36
7.	<b>Návrh akumulční nádrže</b> .....	<b>40</b>
8.	<b>Závěr</b> .....	<b>42</b>
9.	<b>Seznam použité literatury</b> .....	<b>43</b>
10.	<b>Seznam použitých obrázků</b> .....	<b>45</b>
11.	<b>Přílohy</b> .....	<b>46</b>



## Seznam použitých veličin a symbolů

$V_{O_2}$	objem kyslíku	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$V_{vz}$	objem vzduchu	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$V_{CO_2}$	objem oxidu uhličitého ve spalínách	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$V_{N_2}$	objem dusíku ve spalínách	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$V_{H_2O}$	objem vody ve spalínách	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$V_{O_2}$	objem kyslíku ve spalínách	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$V_{sp}$	objem vzniklých spalín	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$\dot{V}_{sp,(N)}$	objem spalín normálních	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$n$	přebytek vzduchu	[1]
$u$	vlhkost vzduchu	[1]
$T$	teplota	[K]
$t$	teplota	[°C]
$t_{stř}$	střední teplota	[°C]
$\Delta t_{stř}$	střední logaritmická hodnota	[°C]
$\rho$	hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\dot{m}$	hmotnostní tok	$[kg \cdot s^{-1}]$
$Q$	výkon	[W]
$c_p$	měrná tepelná kapacita	$[kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
$D$	vnější průměr trubky	[m]
$d$	vnitřní průměr trubky	[m]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
$w$	rychlost spalín	$[m \cdot s^{-1}]$
$\omega$	rychlost vody	$[m \cdot s^{-1}]$

$Re$	Reynoldsovo kritérium	[1]
$Nu$	Nusseltovo kritérium	[1]
$Pr$	Prantlovo kritérium	[1]
$c$	konstanta závislá na druhu proudění	[1]
$\varepsilon_s$	poměrná rozteč trubek	[1]
$S_1$	příčná rozteč trubek	[mm]
$S_2$	podélná rozteč	[mm]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$k$	součinitel prostupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$S$	teplosměnná plocha	$[m^2]$
$l_t$	délka trubky výměníku	[m]
$R$	poloměr zaoblení trubky	[m]
$L_{trubka,osa}$	délka trubky v ose	[m]
$T_{trub,cel}$	počet trubek, celkový	[1]
$s_c$	šířka výměníku celková	[m]
$h$	výška výměníku po kraj trubky	[m]
$l$	délka výměníku	[m]
$L_{celková}$	délka výměníku s přívodem spalín	[m]
$S_{spalín}$	průřez pro průchod spalín	$[m^2]$
$V_{sp(SK)}$	objem spalín při střední teplotě	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$w_{sp,(SK)}$	skutečná rychlost spalín	$[m \cdot s^{-1}]$
$w_{H_2O}$	skutečná rychlost vody	$[m \cdot s^{-1}]$
$CH_4$	obsah methanu	[%]
$N$	obsah dusíku	[%]
$CO_2$	obsah oxidu uhličitého	[%]
$C_m H_n$	obsah nenasycených uhlovodíků	[%]

$O_2$	obsah kyslíku	[m]
-------	---------------	-----

**Horní index**

$v$	vlhký
-----	-------

$s$	suchý
-----	-------

**Dolní index**

$t$	teoretických
-----	--------------

$s$	skutečných
-----	------------

$stř$	střední
-------	---------

$sp$	spaliny
------	---------

$vz$	vzduch
------	--------

# 1. Úvod

V dnešní době dochází ke značnému nárůstu spotřeby energie a paliv (zejména fosilních) na celé Zemi. To směřuje k jejich vyčerpání a také zvyšování cen energií. Proto je nezbytně nutné, abychom šetřili tyto primární zdroje snižováním spotřeby energie, využitím nových zdrojů energie či zefektivněním těch stávajících.

Jednou z těchto možností je využívání odpadního tepla. Využívání odpadního tepla spalin při spalování zemního plynu řadíme jako druhotný energetický zdroj. Odpadní teplo je v mnoha stávajících průmyslových podnicích vypouštěno do atmosféry. Pomocí technologie výměníků tepla (horkých trubic) lze dosáhnout požadované přeměny nevyužitého tepla na užitkovatelnou formu energie. Toto teplo lze využít k výrobě elektrické energie, chlazení průmyslových pecí, vytápění výrobních hal a budov a taky k ohřevu teplé užitkové vody (dále jen TUV).

Ve své bakalářské práci se zabývám návrhem výměníku tepla pro využití spalin z krokové pece ve VUHŽ a.s. Dobrá k ohřevu TUV. Kroková pec je umístěna ve Výzkumném ústavu hutnictví železa a.s. v Dobré u Frýdku-Místku a využívá se k ohřevu ocelových bram. V krokové peci je spalován zemní plyn o určitém složení. Spaliny o teplotě 350 °C doposud odcházely zcela nevyužity komínem do ovzduší. Proto se VUHŽ a.s. rozhodlo pro zavedení tepelného výměníku do spalinového traktu k ohřevu TUV, případně k vytápění jedné z administrativních budov.

## **2. Technologie a technický potenciál využití odpadního tepla**

### **2.1 Ohled na životní prostředí**

Celosvětové problémy v oblasti ekologie, tedy ve vztazích činností člověka k okolnímu prostředí, se nahromadily. Chceme-li si zachovat životní prostředí v únosné míře, musíme nutně mobilizovat veškerý svůj um a schopnost k tomu, abychom dále toto prostředí nezhoršovali. Na první pohled se zdá, že problémy ekologické a energetické spolu příliš nesouvisují, ale opak je pravdou. Racionální hospodaření s prvotními energiemi, vyhledávání nových zdrojů, využívání druhotných a netradičních zdrojů má přímý vliv na zlepšení životního prostředí. Je tedy třeba věnovat maximální pozornost všem racionálně využitelným novým zdrojům energie – zde do kategorie druhotných zdrojů patří i odpadní teplo. Využíváním odpadního tepla lze výrazně přispět k omezení nároků na primární zdroje energií, především pro potřeby vytápění a ohřevu TUV.

Na přelomu 21. století se výrazně zdokonalila, postupně uvedla do provozu a vyvinula zařízení, která proces spalného tepla garantují. Jsou to prostředky, které zajistí vysoký faktor využití energie a snížení emisí škodlivých látek vypouštěných do ovzduší.

### **2.2 Potenciál využití odpadního tepla**

Zpětné získávání tepla ze spalin kotlů a pecí je jedním z nejefektivnějších zhodnocení nutných k vynaložení investičních prostředků. Jde téměř vždy o značná množství využitelných horkých plynů o vysoké úrovni, která lze nepříliš složitě transformovat na horkou či teplou vodu. Mnohé plynové kotle užívané v praxi jak staršího typu, tak i novější konstrukce dosud nejsou vybaveny ekonomizérem pro využití spalin. Spaliny odcházejí do komína bez dalšího využití. Při zabudování ekonomizéru do proudu spalin vzniká dostatečná teplosměnná plocha, pomocí níž lze odpadní teplo získat k přeměně na potřebnou energii. Pro každý tepelný zdroj lze využít řadu možností a variant při řešení této situace.

## **2.3 Podmínky využívání odpadního tepla spalin**

- Množství spotřeby vody
- Časový harmonogram spotřeby vody
- Ekonomické rozvržení
- Teplota a množství spalin

## **2.4 Důvody využití druhotných energetických zdrojů**

Většina výrobních i nevýrobních procesů je doprovázena energetickými ztrátami. Například zavedením rekuperátoru či regenerátoru využívající odpadní teplo k ohřevu spalovacího vzduchu snížíme energetické ztráty, tím i spotřebu primárního zdroje a zároveň celkové náklady na výrobní proces.

Základní důvody využití druhotných energetických zdrojů:

- snížení ekonomických nákladů na primární palivo
- ochrana životního prostředí
- celkové snížení spotřeby primárních zdrojů
- snížení nároků na vysokoteplotní odolnost konstrukcí komínů

### 3. Výzkumný ústav hutnictví železa a.s.

Výzkumný ústav hutnictví železa neboli VÚHŽ a.s. je společnost, jehož 100% akcionářem jsou TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s.

VÚHŽ a.s. byla původně založena 1. dubna 1948 tehdejším generálním ředitelstvím Československé hutě se sídlem v Praze. Jako akciová společnost vznikla až 1. května 1992 kupónovou privatizací. VÚHŽ a.s. sídlí ve vybudovaném areálu v Dobré u Frýdku-Místku. Společnost se představuje svou malosériovou výrobou zaměřenou především exportním směrem na oblast hutní výroby (odstředivé lití, válcování profilů za tepla) a výrobou měřicí, regulační a automatizační techniky pro průmysl. Další hlavní součástí podniku je zázemí pro výzkum, vývoj nových materiálů a technologií, akreditované zkušebnictví a poradenství.

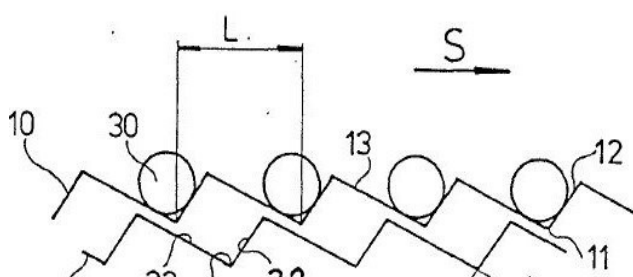
VÚHŽ a.s. exportuje přes polovinu své výroby mimo Českou republiku. Největšími odběrateli jsou Německo, Itálie, Francie, Polsko. Mimo Evropskou unii také Saudská Arábie, Indie nebo Čína.



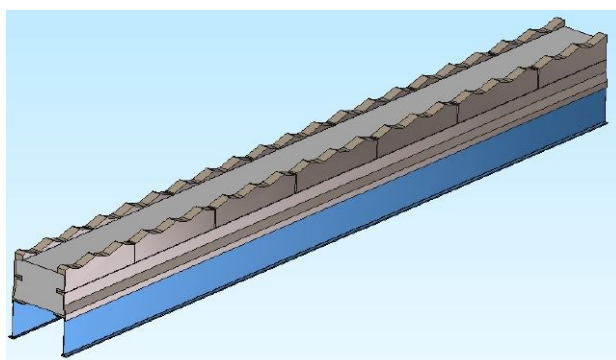
*Obr. 1 Letecký snímek areálu VÚHŽ a.s. Dobruška [11]*

## 4. Kroková pec

Kroková pec je primární strojní zařízení sloužící k ohřevu bram ve válcovnách i k tepelnému zpracování. Provedení krokových pecí pro tepelné zpracování vsázky tvaru tyčí a hřidelí, např. výkovků z rotačního kování, je založeno na ověřených konstrukcích krokových mechanismů s nechlazenými kovovými trámci, na oboustranném ohřevu materiálu k dosažení vysoké homogenity teplotního pole po průřezu pece a na symetrii rozložení teplot ve vsázce. Pohyb v peci je nepravidelný (v krocích). Roštnice (základní prvek činné plochy roštu) dopravníku jsou navrženy pro teploty blízké se 1000 °C ze žáruvzdorné slitiny. Pro vyšší teploty jsou roštnice keramické. Základním stavebním



Obr. 2 Schéma trojúhelníkového profilu trámu [6]



Obr. 3 Žáruvzdorný trám [7]

prvkem krokovacího mechanismu je dvojice lišt. Jedna z lišt je pevně spojena s nístějí pece a druhá lišta je pohyblivá ve vertikálním směru. Obě lišty mají profil trojúhelníků, které vytváří tvarově shodné zářezy. Ty umožňují provádět krokovací cyklus pouze ve vertikálním směru.

Krokovací zařízení je umístěno pod pecí. Pomocí dvou hydraulických motorů je zajištěn pohon mechanismu. Zařízení je chráněno žárobetonovou izolací.

Parametry pece:

palivo:	zemní plyn	množství paliva:	$0,0236 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
výkon:	1 500 [kW]	6 vertikálních hořáků	
teplota v komoře:	1 200 [°C]	teplota spalin:	700 [°C]
š x d	4,3x4,16 [m]	výkon pece:	$2,5 \text{ [tun} \cdot \text{hod}^{-1}]$



Materiál pro následné válcování je ohříván ze studeného stavu, z venkovní teploty (kde je materiál skladován) na teplotu 980 °C. Ohřev materiálu je prováděn v průchozí komoře, kde je instalováno 6 vertikálních hořáků.



*Obr. 4 Kroková pec*

Teplota spalin v komoře se pohybuje kolem 1 200 °C. Spaliny z komory jsou vedeny dále o teplotě 700 °C do rekuperátoru, který předehtívá spalovací vzduch. Z rekuperátoru jsou spaliny o teplotě cca 350 °C vedeny kouřovodem do komína. Právě do tohoto kouřovodu (mezi stávající rekuperátor a komín) by měl být vsazen výměník sloužící k ohřevu TUV pro administrativní budovu válcovny a sociální zařízení.

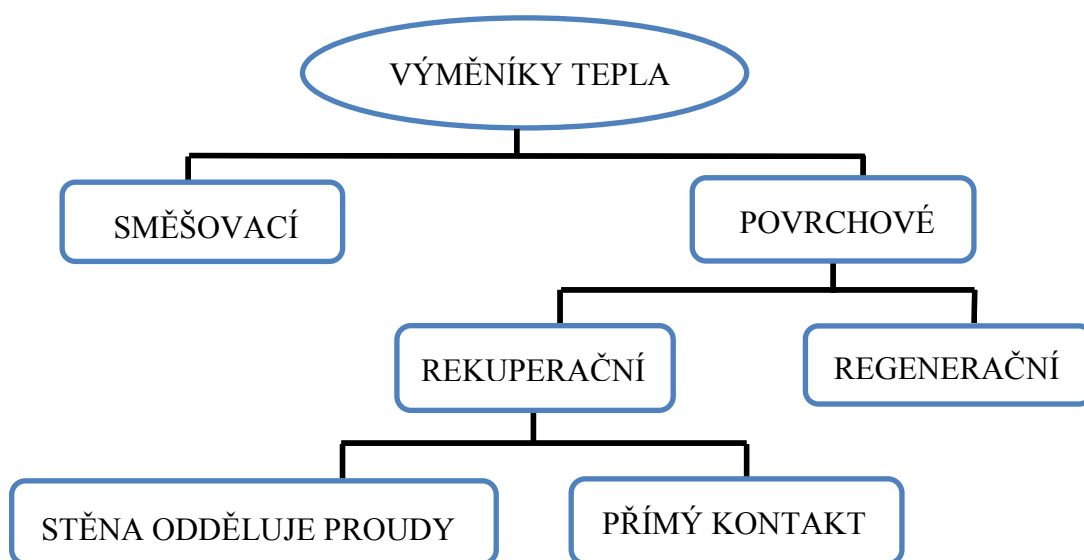


*Obr. 5 Spalinový kouřovod s ukázkou vsazení výměníku*

## 5. Výměníky tepla

Výměník tepla je sekundární energetické zařízení (začleněn mezi transformátory) sloužící efektivním přestupem tepla teplonosným médiem s vysokou koncentrací tepla na jiné médium. Jsou zastoupeny jak ve výrobní, tak i v nevýrobní sféře. V energetice se řadí výměníky mezi nejstarší a nejpoužívanější strojí zařízení. Členění z hlediska jejich využití: ohřívače, kotle, výparníky.

### 5.1 Základní dělení



Obr. 6 Schématická struktura rozdělení výměníků

**Směšovací** – výměník nemá teplosměnné plochy (chladicí věž). Ohřívané a ohřívací médium se smíchá a vytváří homogenní směs. Teplo je předáváno mísením dvou médií o rozdílných teplotách. U chladicích věží zajišťuje rychlost proudění vzduchu výška věže (tvar – hyperboloid), případně ventilátor. Je třeba doplňovat ztráty vody.

**Regenerační** – dělíme na statické nebo rotační. Regenerační výměníky jsou tvořeny absorberý tepla, kterými střídavě protéká teplé a chladné médium (ohříváky vzduchu a plynu vysokých pecí, ocelářských pecí aj.). Čas vyměňování sekcí je dán dobou průchodu teplé vlny od vstupu do výstupu absorberu.

**Rekuperační** – zde jsou obě média rozdělena nepropustnou stěnou, která zabraňuje jejich promísení, avšak zajišťuje dostatečnou tepelnou vodivost. Teplo je předáváno z teplejšího média médiu chladnějšímu kontinuálně složeným přestupem tepla dělicí stěnou.

V následujících podkapitolách bude provedeno roztrídění a stručný souhrn informací jednotlivých druhů rekuperačních výměníků tepla.

### 5.1.1 Rozdělení výměníků podle způsobu přenosu tepla

**Konvekční výměník** – proudění médií rozhoduje o způsobu předání tepla. Vstupní teplota spalin se pohybuje okolo 700 – 800 °C. Rekuperátory mohou být žebrované nebo jehlované. Obě konstrukce jsou vytvořeny procesem lití. Výhodou je rozvinutá teplosměnná plocha.

rekuperátor jehlový – max. přestup tepla  $k = 120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

rekuperátor žebrovaný – max. přestup tepla  $k = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

**Sálavý výměník** – většina množství tepla se předá pouze sáláním. Teplota na vstupní straně je 800 – 900 °C.

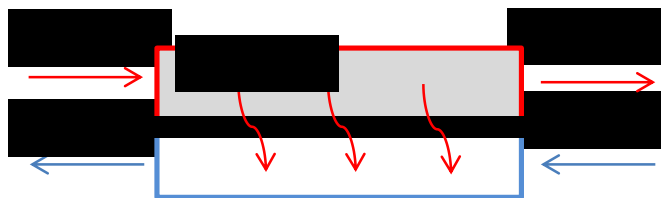
**Kombinovaný výměník** – kombinace konvekčního a sálavého přestupu tepla a teplota spalin se přesně nevymezuje.

### 5.1.2 Rozdělení výměníků podle účelu a použití

- 1) Ohříváky – u ohřívaného média dochází ke zvýšení teploty, aniž by došlo ke změně fáze (spalinové ohříváky vody).
- 2) Výparníky – ohřívané médium (kapalina) se mění v páru.
- 3) Přehříváky – zařízení zajišťuje zvyšování teploty mokré syté páry, případně přehřáté páry.
- 4) Chladiče – u ochlazovaného média dochází ke snižování teploty, aniž by došlo ke změně fáze.
- 5) Parní generátory – složený systém výměníků (ohříváků, výparníku a přehříváků), slouží k výrobě přehřáté (syté) páry z kapaliny.
- 6) Sušárny – přivedením tepla dosahuje snížení vlhkosti v pevné fázi.

### 5.1.3 Rozdělení výměníků podle toku média

- Protiproud

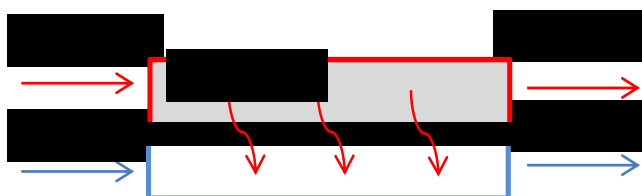


*Obr. 7 Protiproud*

tekutina:

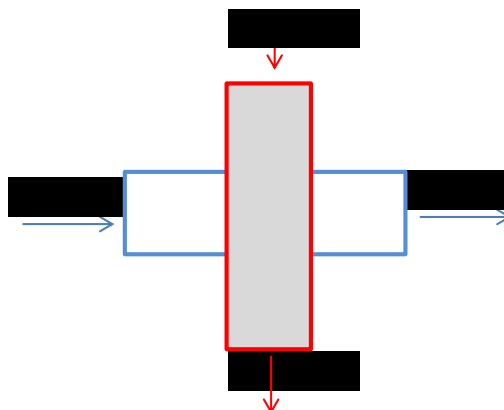
**A-teplejší, B-chladnější, i-vstup, e-výstup**

➤ Souproud



*Obr. 8 Souproud*

➤ Křížový tok média



*Obr. 9 Křížový tok*

## 5.2 Trubkové výměníky tepla

Trubkové výměníky tepla byly začleněny do energetických zařízení již v 19. století. Nejčastěji se však používají pro ústředí vytápění, ohřev teplé vody, potravinářský a textilní průmysl. Plášť a vnitřní část výměníku je vyrobena převážně z austenitické oceli s titanem,

který má vysokou odolnost proti mezikrystalové korozi. Teplosměnné plochy tvoří trubky, nejčastěji však svazky trubek.

- Dvoutrubkové
- Kotlové (Shell & Tube)
- Vzduchové

### 5.2.1 Dvoutrubkový výměník

Konstrukce tzv. trubka v trubce je konstrukce, v níž obě média proudí souběžně (protiproud i souproud) v trubce, či mezidruhových prostorech.

Výhody:

- Protiproud
- Vysoké tlaky (30 MPa plášť, 140 MPa trubka)
- Teplota (100 – 600 °C)
- Pro jakákoliv média, snadná údržba

Nevýhody:

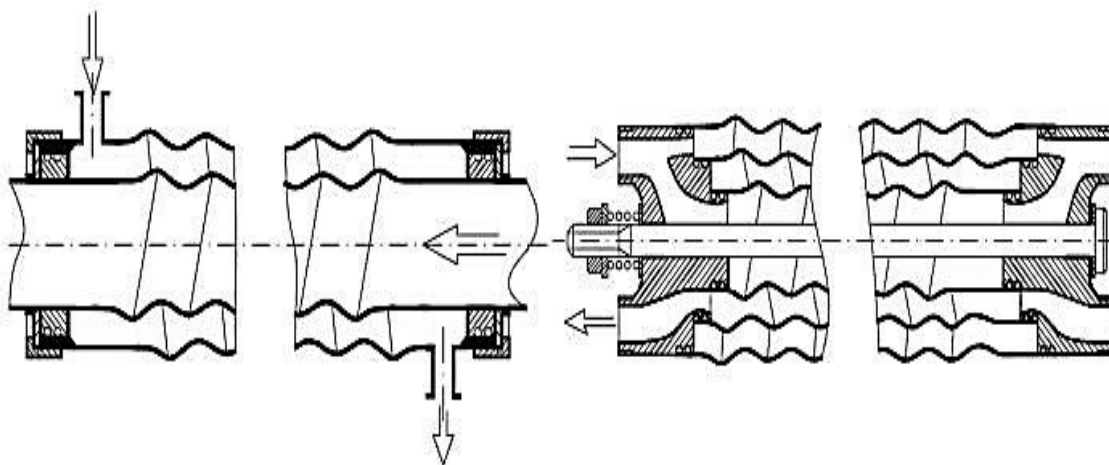
- Drahé pro velké výkony (nad 1 MW)

Existuje řada rozdílných seskupení, např. ve formě dvou trubek stočených do spirály, případně šroubovice. Často se také používají žebrované trubky. Dalším předmětem pro zvyšování součinitele přestupu tepla se v laminárním režimu osvědčují různé vložky. A to ve formě zkroucených pásků, nebo zvlněné plechové pásky orientované ve směru osy trubky.

Svařované plášťové výměníky tepla dvoutrubkové jsou určeny především pro nejnáročnější aplikace použití (nejvyšší tlaky a teploty, požadavky na těsnost).



Obr. 10 Dvoutrubkový výměník [10]



Obr. 11 Dvoutrubkový výměník „trubka v trubce“ [8]

### 5.2.2 Shell & Tube – kotlové

Shell & Tube neboli výměníky kotlové jsou již dlouhá léta nejčastějším typem výměníků, které jsou vhodné pro vysoké teploty a tlaky médií. Jsou univerzálně použitelné jak pro kapaliny, tak i plyny. Jedná se o nejrozšířenější typ používaný v chemickém průmyslu (až 80 % v EU).

Výhody:

- Přizpůsobivost, robustnost
- Snadná údržba – čištění, opravy
- Standardizace (konstrukce, výpočty, materiály)
- Pro jakákoliv média

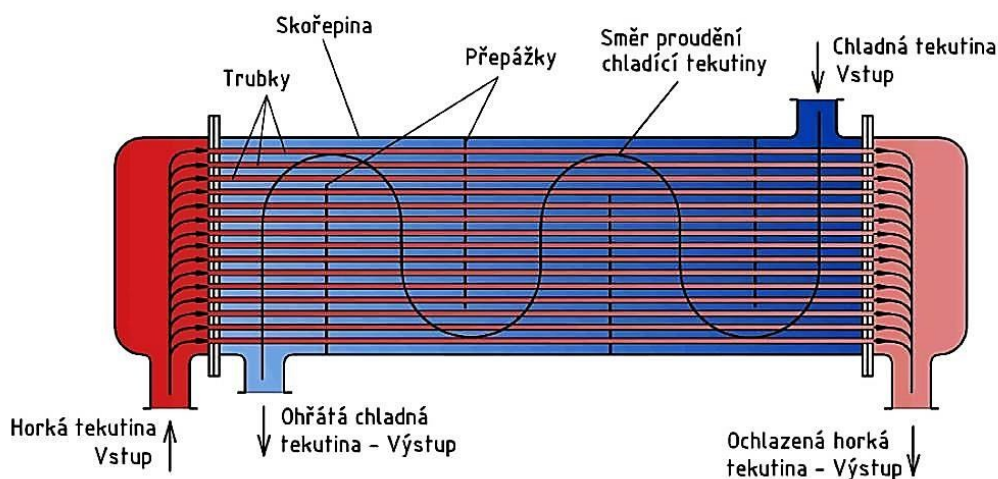
Nevýhody:

- Velká zastavěná plocha



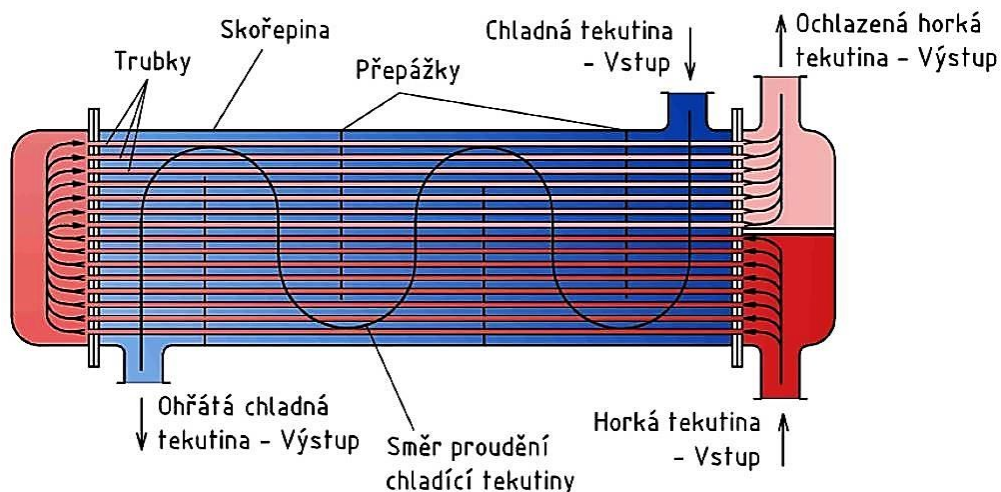
Obr. 12 Shell & Tube [10]

Vzájemné směry proudů se v jednotlivých částech výměníku mění. Záleží na vedení toku v mezitrubkovém prostoru, který může být rozčleněn podélnými, nebo příčnými přepážkami. Směr proudění v trubkách lze měnit pomocí dělicí přepážky v rozdělovacích komorách-hlavách výměníku.



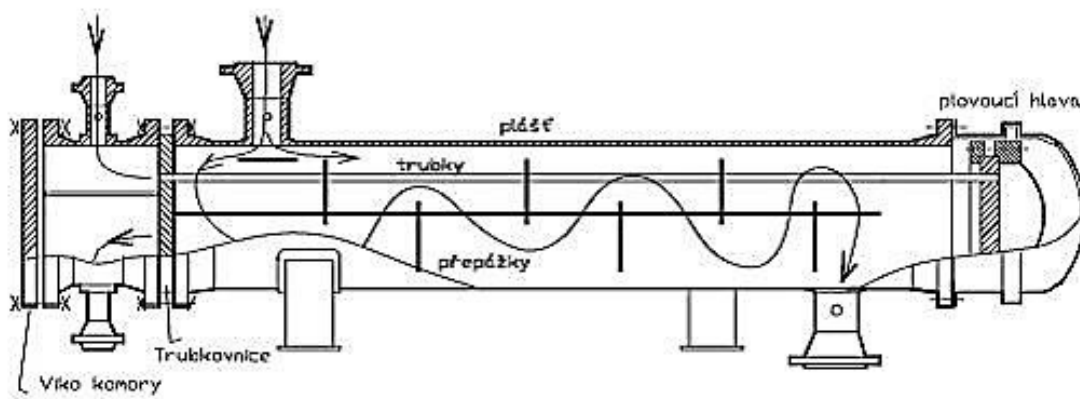
Obr. 13 Protiproud [10]





Obr. 14 Protiproud i sou proud [10]

Na obrázku č. 12 vidíme typ výměníku, který má přední komoru rozdělenou přepážkou, takže polovinou trubek proudí tekutina zleva doprava, v pravé hlavě se proud obrací a dolními trubkami proudí zprava doleva. Díky přemístění toků v horní polovině dochází zde k souproudu a v dolní polovině k protiproudu teplosměnných médií. Toto uspořádání proudu označujeme jako 1-2, což znamená jeden chod v plášti a dva chody v trubkách.



Obr. 15 Kotlový výměník [8]

### 5.3 Deskové výměníky

Základní rozdíl mezi trubkovými a deskovými výměníky je v tom, že trubka snese vysoký přetlak, kdežto deska ne. Deskový výměník tepla se skládá z tenkých kovových desek na sobě naskládaných, stažených v horní části tyčemi. Takto naskládané desky jsou

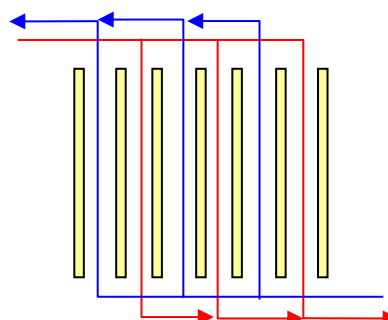
uloženy do ráků, případně navzájem spájeny. Média (primární a sekundární) jsou přiváděna do systému výměníku hrdly, která jsou zasazena do víka hlavy. Desky se vyrábí v rozdílných velikostech s různými vzory. To umožňuje přizpůsobení výměníků různým provozním parametrům. Deskové výměníky mají větší účinnost než trubkové a také jsou podstatně méně náchylné k zanášení.

Výhody:

- Vysoký součinitel přestupu tepla
- Rozebíratelnost → snadná údržba
- Cena
- Efektivita (až 95 %)

Nevýhody:

- Riziko netěsností
- Životnost těsnění
- Omezený rozsah teplot a tlaků  
(2,5 MPa, 170 °C)
- Pouze pro kapaliny

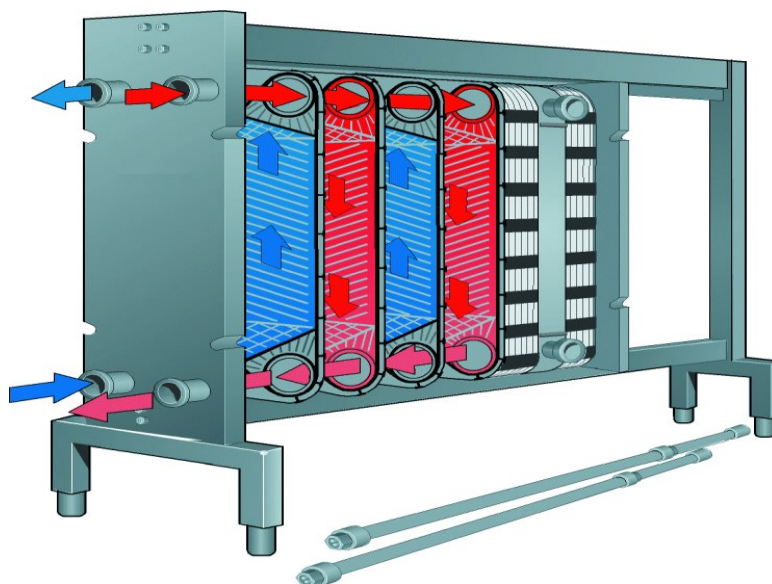


Obr. 16 Schéma proudění médií [10]

### 5.3.1 Deska v rámu

Jisté omezení aplikovatelnosti představují vysoké teploty a netěsnosti. To jsou hlavní důvody menšího rozšíření v chemickém a potravinářském průmyslu. Na druhou stranu jsou deskové výměníky vhodné pro velmi agresivní prostředí, protože výrobci dodávají desky nejen z nerezové oceli, ale i z titanu a uhlíkových kompozitů. Deskové výměníky se vyrábějí i v nerozebíratelném provedení. Jde o pájené nebo svařované deskové výměníky. Ty se používají ve výměníkových stanicích rozvodu tepla a v technice chlazení. Pájené výměníky mají přípustný tlak 3 MPa a teploty do 200 °C, svařované jsou určeny pro tlaky 4 MPa a teploty do 300 °C.

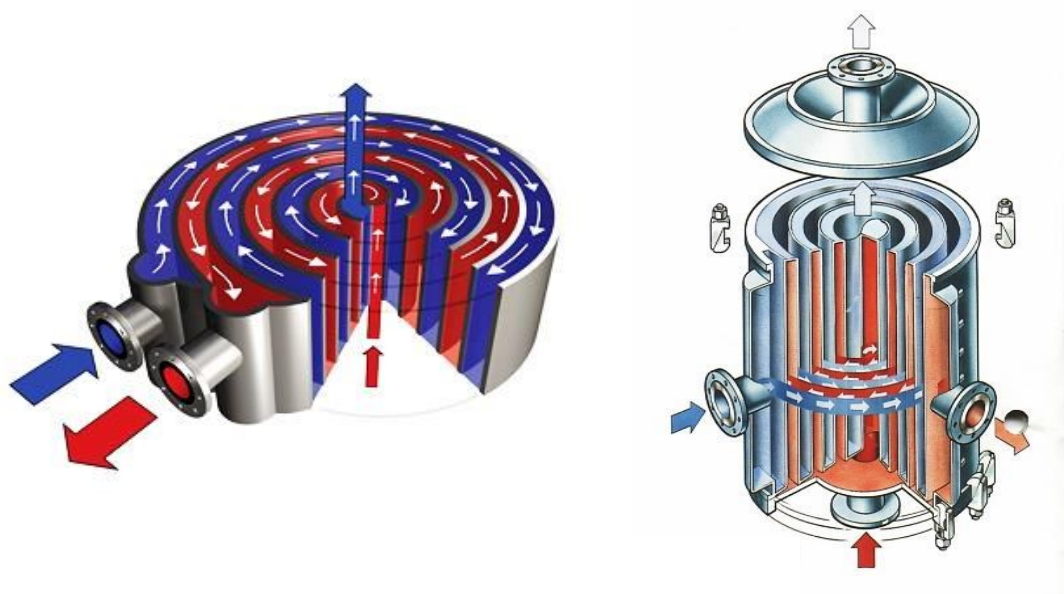




Obr. 17 Dekový výměník rozebíratelný [16]

### 5.3.2 Spirálové výměníky

Spirálové výměníky spadají do kategorie deskových výměníků. Obě média proudí (obvykle v protiproudu) ve spirálovitě křivolakých kanálech. Zakřivení má za následek zvýšení intenzity přestupu tepla a snižuje kritickou hodnotu  $Re$  přechodu do turbulence. Nevýhodou, stejně jako u všech deskových výměníků, je omezení tlaků. Oproti trubkovým výměníkům jsou spirálové kompaktnější – mají při stejném zastavení prostoru větší teplosměnnou plochu. Další výhodou jsou nízké tlakové ztráty a malý sklon k zanášení, využití v potravinářském, zpracovatelském a metalurgickém průmyslu.

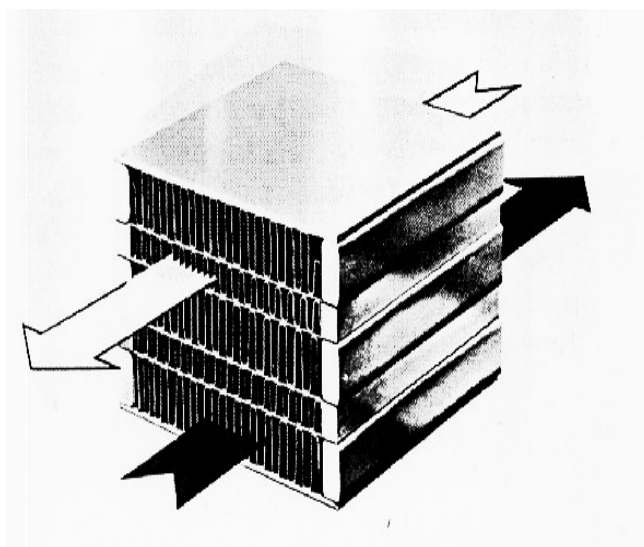


Obr. 18 Řez spirálovým výměníkem [12, 15]

### 5.3.3 Deskožebrové kompaktní výměníky

Kompaktní deskožebrové výměníky jsou výměníky s měrnou teplosměnnou plochou větší než  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Použití spíše pro plyny a tlaky do 1 MPa, zcela vyloučena jsou korozní média nebo média s tendencí k zanášení. Rozsah teplot bývá od  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  až po  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  pro konstrukce z nerezů. Vysoká je i efektivita, která se pohybuje okolo hranice 98 %.

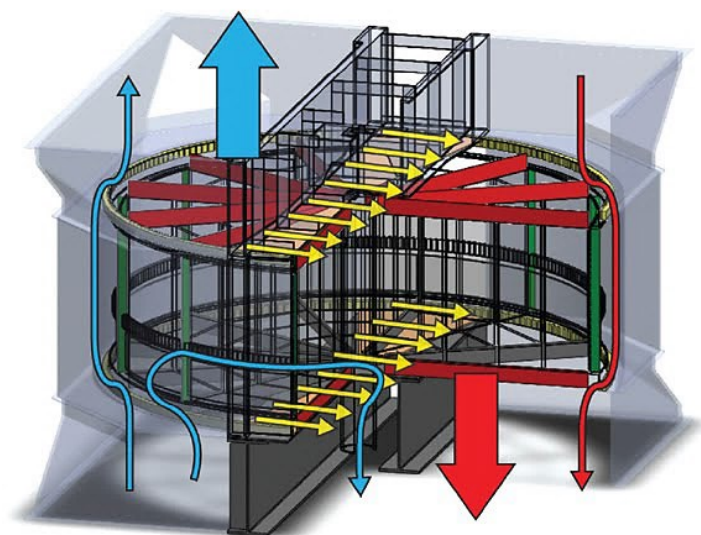
Rovné desky jsou spájené k sobě a prokládané vlněnými žebrovými deskami ve vakuové peci. Pro běžné užití se navrhuje sedm i více proudů.



*Obr. 19 Žebrový výměník [10]*

### 5.4 Ljungström regenerační výměník

Princip regeneračního vertikálního výměníku Ljungström je znázorněn na obr. 20. Ohřívací médium předává teplo této výplni a následně se dané naakumulované teplo předává médiu ohřívanému. Rotor je vestavěn do uzavřeného prostoru, rozděleného a současně utěsněného sektorovými deskami na spalínovou a vzduchovou část. Utěsnění rotoru je provedeno pevnými kovovými ucpávkami upevněnými radiálně a axiálně na konstrukci mezi jednotlivými sektory. Výhřevná náplň musí splňovat několik požadavků, jako dobrý přenos tepla, malé tlakové ztráty, levné zhotovení, snadné čištění za provozu, odolnost proti korozi. Výhřevná náplň je uložena v rotoru ve dvou až třech vrstvách.



*Obr. 20 Výměník Ljungström [14]*

## 6. Návrh tepelného výměníku

Na základě rešeršní části bakalářské práce navrhuji rekuperační trubkový výměník. Vodotrubný spalínový výměník bude tvořen svazkem trubek uspořádaných a stočených za sebou. Celý svazek bude vsazen do tělesa výměníku. Spaliny budou proudit kolmo na svazek trubek. Podle toku média (vody) řadím tento výměník jako protiproudý.

K ohřevu materiálu v krokové peci slouží hořáky zemního plynu. Spotřeba zemního plynu je  $84,96 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{hod}^{-1}$ . Pomocí tepelného výměníku využijeme odpadní teplo z pece pro ohřev teplé užitkové vody.

Zadané parametry vycházejí z průměrných provozních parametrů a z měření provedené firmou ENERGOS – Miroslav Baručák v roce 2010.

Zadané parametry:

➤ Množství teplé vody:	$1,80 \text{ [m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}]$
➤ Teplota spalin na vstupu:	$350,00 [^{\circ}\text{C}]$
➤ Požadovaná teplota topné vod:	$60,00 [^{\circ}\text{C}]$
➤ Teplota vody na vstupu do výměníku:	$10,00 [^{\circ}\text{C}]$
➤ Přebytek vzduch ve spalinách:	$1,66 [\%]$
➤ Výchřevnost:	$34\,200,00 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^3]$
➤ Hustota:	$0,69 \text{ [kg} \cdot \text{m}^3]$
➤ Koncentrace $\text{O}_2$ :	$8,40 [\%]$

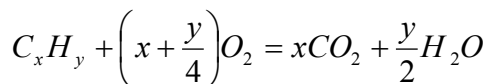
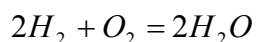
Všechny výpočty byly provedeny v Microsoft Office – Excel 2007 (viz příloha č. 2).

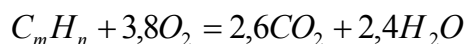
### 6.1 Stechiometrie

**Složení zemního plynu:**

$$\text{CO}_2 = 0,05 [\%, ], C_m H_n = 1,16 [\%], N_2 = 0,79 [\%], CH_4 = 98 [\%]$$

**Spalovací rovnice**





### Množství potřebného kyslíku

$$V_{O_2}^t = 2 \cdot CH_4 + 3,8 \cdot C_m H_n \quad (1)$$

$$CH_4 \quad \text{podíl methanu v palivu} \quad [1]$$

$$C_m H_n \quad \text{podíl nenasycených uhlovodíků v palivu} \quad [1]$$

$$V_{O_2}^t = 2 \cdot 0,98 + 3,8 \cdot 0,0116 = 2,004 \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

### Množství vzduchu teoretického suchého

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2}^t}{0,21} \quad (2)$$

$$V_{O_2}^t \quad \text{množství potřebného kyslíku} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{vz,t}^s = \frac{2,004}{0,21} = 9,543 \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

### Přebytek vzduchu

$$n = 1 + \frac{O_2}{0,21 - O_2} \quad (3)$$

$$O_2 \quad \text{podíl kyslíku ve spalínách} \quad [1]$$

$$n = 1 + \frac{0,084}{0,21 - 0,084} = 1,66 \quad [1]$$

### Množství vody ve vzduchu

$$V_{H_2O} = 2 \cdot CH_4 + 2,4 \cdot C_m H_n \quad (4)$$

$$CH_4, C_m H_n \quad \text{viz rovnice č. 1} \quad [1]$$

$$V_{H_2O} = 2 \cdot 0,98 + 2,4 \cdot 0,0116 = 1,988 \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

### Množství vzduchu teoretického vlhkého

$$V_{vz,t}^v = V_{vz,t}^s + V_{H_2O} => \quad (5)$$

$$V_{vz,t}^s \quad \text{Množství vzduchu teoretického suchého (2)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{H_2O} \quad \text{Množství vody ve vzduchu (4)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{vz,t}^v = 9,543 + 1,988 = 11,527 \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

### Vlhkost vzduchu

$$v = \frac{V_{vz,t}^v}{V_{vz,t}^s} \quad (6)$$

$$V_{vz,t}^s \quad \text{Množství vzduchu teoretického suchého (2)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$V_{vz,t}^v \quad \text{Množství vzduchu teoretického vlhkého (5)} \quad [m^3_N \cdot m^{-3}_N]$$

$$v = \frac{11,527}{9,543} = 1,208 \quad [1]$$

### Množství vzduchu suchého skutečného

$$V_{vz,s}^s = n \cdot V_{vz,t}^s \quad (7)$$

$V_{vz,t}^s$	Množství vzduchu teoretického suchého (2)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$n$	Přebytek vzduchu (3)	[1]
	$V_{vz,s}^s = 1,66 \cdot 9,543 = 15,899$	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$

#### Množství vzduchu vlhkého skutečného

$$V_{vz,s}^u = v \cdot V_{vz,s}^s \quad (8)$$

$V_{vz,s}^s$	Množství vzduchu skutečného suchého (7)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$v$	Vlhkost vzduchu (6)	[1]
	$V_{vz,s}^u = 1,208 \cdot 15,899 = 19,212$	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$

#### Objem CO<sub>2</sub> ve spalínách

$$V_{CO_2} = CH_4 + 2,6 \cdot C_m H_n + CO_2 \quad (9)$$

$CH_4$	Podíl methanu v palivu	[1]
$C_m H_n$	Podíl nenasycených uhlovodíků v palivu	[1]
$CO_2$	Podíl oxidu uhličitého v palivu	[1]
	$V_{CO_2} = 0,98 + 2,6 \cdot 0,0116 + 0,0005 = 1,011$	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$

#### Objem N<sub>2</sub> ve spalínách

$$V_{N_2} = N_2 + 0,79 \cdot V_{vz,s}^s \quad (10)$$

$V_{vz,s}^s$	Množství vzduchu skutečného suchého (7)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$N_2$	Podíl dusíku v palivu	[1]
	$V_{N_2} = 0,008 + 0,79 \cdot 15,899 = 12,568$	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$

#### Objem H<sub>2</sub>O ve spalínách

$$V_{H_2O} = 2 \cdot CH_4 + 2,4 \cdot C_m H_n + (v - 1) \cdot V_{vz,s}^s \quad (11)$$

$V_{vz,s}^s$	Množství vzduchu skutečného suchého (7)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$CH_4$	Podíl methanu v palivu	[1]
$C_m H_n$	Podíl nenasycených uhlovodíků v palivu	[1]
$v$	Vlhkost vzduchu (6)	[1]
	$V_{H_2O} = 2 \cdot 0,98 + 2,4 \cdot 0,0116 + (1,208 - 1) \cdot 15,899$	
	$V_{H_2O} = 5,301$	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$

#### Objem O<sub>2</sub> ve spalínách

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot V_{vz,t}^s \cdot (n - 1) \quad (12)$$

$V_{vz,t}^s$	Množství vzduchu teoretického suchého (2)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$n$	Přebytek vzduchu (3)	[1]
	$V_{O_2} = 0,21 \cdot 9,543 \cdot (1,66 - 1) = 1,336$	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$

### Množství vzniklých spalin teoretických suchých

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2} + V_{N_2} \quad (13)$$

$V_{CO_2}$	Objem $CO_2$ ve spalinách (9)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$V_{N_2}$	Objem $N_2$ ve spalinách (10)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
	$V_{sp,t}^s = 1,001 + 12,568 = 13,569$	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$

### Množství vzniklých spalin skutečných suchých

$$V_{sp,s}^s = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad (14)$$

$V_{CO_2}$	Objem $CO_2$ ve spalinách (9)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$V_{N_2}$	Objem $N_2$ ve spalinách (10)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$V_{O_2}$	Objem $O_2$ ve spalinách (12)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
	$V_{sp,s}^s = 1,011 + 12,568 + 1,336 = 14,914$	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$

### Množství vzniklých spalin skutečných vlhkých

$$V_{sp,s}^v = V_{sp,s}^s + V_{H_2O} \quad (15)$$

$V_{sp,s}^s$	Množství spalin skutečných suchých (14)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$V_{H_2O}$	Objem $H_2O$ ve spalinách (11)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
	$V_{sp,s}^v = 14,914 + 5,301 = 20,215$	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$

### Objem spalin

$$\dot{V}_{sp(N)} = V_{sp,s}^v \cdot SPOT\check{R}_{ZP} \quad (16)$$

$V_{sp,s}^v$	Množství spalin skutečných vlhkých (15)	$[m^3_N \cdot m^{-3}_N]$
$SPOT\check{R}_{ZP}$	Spotřeba zemního plynu	$[m^3_N \cdot \text{hod}^{-1}]$

$$\dot{V}_{sp(N)} = 20,215 \cdot 84,96 = 1717,485 [m^3_N \cdot \text{hod}^{-1}] \rightarrow 0,477 [m^3_N \cdot s^{-1}]$$

## 6.2 Výkon výměníku

### Měrná tepelná kapacita spalin

Výpočet byl proveden na základě VÚCHU, a.s. Brno. Do indexu  $i$  zastupuje jednotlivé plyny ve spalinách ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ).

	A	B	C	D	E
<b>CO2</b>	31,95	$3,570 \cdot 10^{-2}$	$-1,529E \cdot 10^{-5}$	$2,312E \cdot 10^{-9}$	$-3,758E \cdot 10^{-5}$
<b>O2</b>	24,33	$1,661E \cdot 10^{-2}$	$-7,446E \cdot 10^{-6}$	$1,246E \cdot 10^{-9}$	$6,777E \cdot 10^{-6}$
<b>N2</b>	23,63	$1,254E \cdot 10^{-2}$	$-4,136E \cdot 10^{-6}$	$4,801E \cdot 10^{-10}$	$1,724E \cdot 10^{-5}$
<b>H2O</b>	25,36	$1,933E \cdot 10^{-2}$	$-3,798E \cdot 10^{-6}$	$1,751E \cdot 10^{-10}$	$2,538E \cdot 10^{-5}$

tab. 1 Koeficienty pro výpočet  $c_p$

## Měrná tepelná kapacita

$$c_{pi} = \frac{A_i + B_i \cdot T_{stř} + C_i \cdot T^2 + D_i \cdot T^3 + \frac{E_i}{T^2}}{22,4} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (18)$$

T Teplota spalin [K]

t Teplota spalin [°C]

	y <sub>i</sub> [1]	c <sub>pi</sub> [kJ·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	c <sub>p</sub> [kJ·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
<b>CO2</b>	0,050	2,179	<b>1,456</b>
<b>O2</b>	0,066	1,433	
<b>N2</b>	0,622	1,338	
<b>H2O</b>	0,262	1,606	

tab. 2 Výpočet měrné tepelné kapacity spalin

## Měrná tepelná kapacita směsi

$$c_{p(směsi)} = \sum c_{pi} \cdot y_i \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (19)$$

## Hmotnostní tok vody

$$t_{stř, H_2O} = \frac{t_{vstup, H_2O} + t_{výstup, H_2O}}{2} = \frac{10 + 60}{10} \quad (20)$$

$$t_{stř, H_2O} = 35 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\rho_{H_2O} = 994 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}}{3600} = \frac{1,8 \cdot 994}{3600} \quad (21)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 0,497 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

## Výkon výměníku

$$Q_{vým} = \dot{m}_{H_2O} \cdot C_{P_{H_2O}} \cdot (t_{výstup, H_2O} - t_{vstup, H_2O}) \quad (22)$$

$$Q_{vým} = 0,497 \cdot 1,1781 \cdot 50 = 103,826 \quad [\text{kW}]$$

## Teplota spalin na výstupu

$$Q_{vým} = \dot{V}_{SP} \cdot C_{P_{SP}} \cdot (t_{sp, vstup} - t_{sp, výstup}) \Rightarrow t_{sp, výstup} \quad (23)$$

$$t_{sp, výstup} = t_{sp, vstup} - \frac{Q_{vým}}{\dot{V}_{SP} \cdot C_{P_{SP}}} \Rightarrow 350 - \frac{103,826}{0,48 \cdot 1,456} \quad (24)$$

$$t_{sp, výstup} = 200,6 \quad [^{\circ}\text{C}]$$



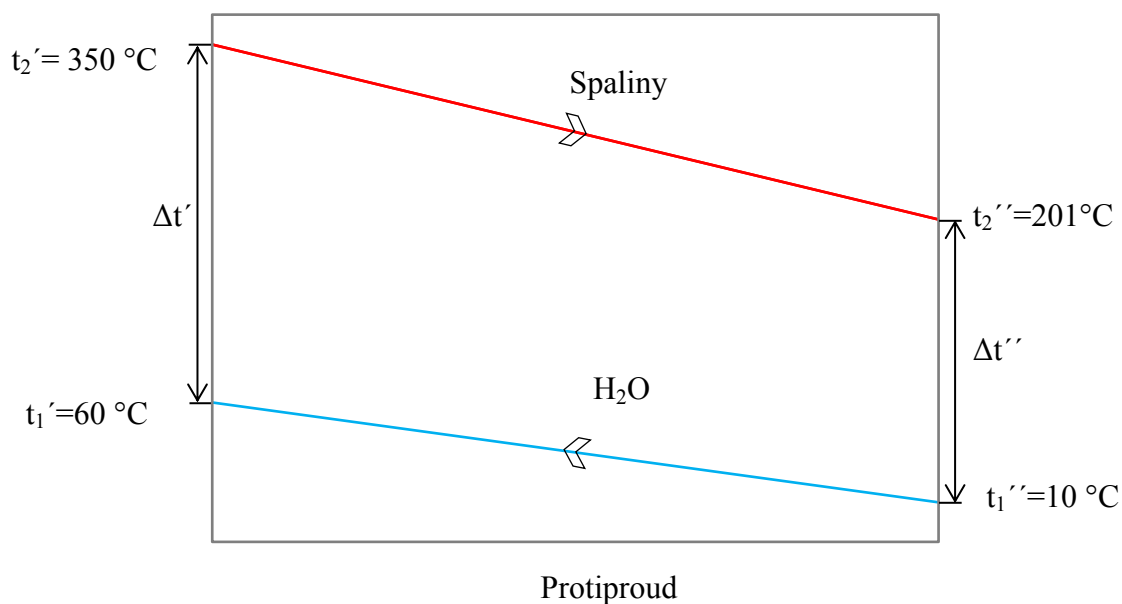
Střední logaritmická teplota

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \quad (25)$$

$\Delta t'$       teplotní spád na začátku výměníku      [°C, K]

$\Delta t''$       teplotní spád na konci výměníku      [°C, K]

$$\Delta t_{stř} = \frac{290 - 190,6}{\ln \frac{290}{190,6}} = 236,81 \quad [^{\circ}\text{C}]$$



Obr. 21 Průběh teplot v protiproudém výměníku

## 6.2.1 Tepelná bilance pro spaliny

Hodnoty pro výpočet kritériálních rovnic jsou aplikovány ze střední teploty spalin. Charakteristickým rozměrem je vnější průměr trubky.

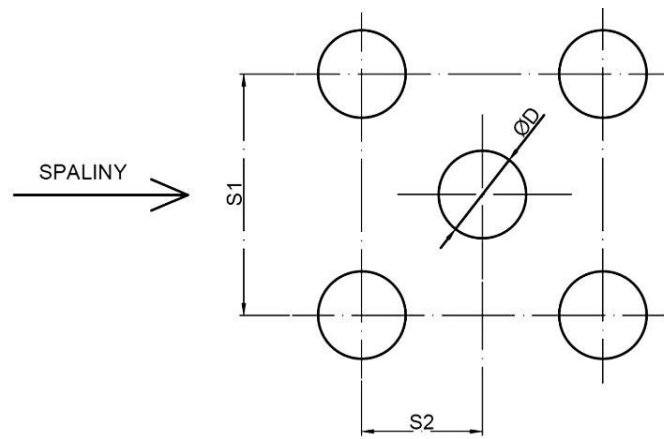
**Střední teplota spalin**

$$t_{stř,sp} = \frac{t_{vstup,sp} + t_{výstup,sp}}{2} = \frac{350 + 200,6}{2} = 275,3 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (26)$$

**Vnější průměr trubky**

$$D = 0,029 \quad [\text{m}] \quad (27)$$

Volím proudění kolmo na svazek trubek uspořádaných střídavě. Postup výpočtu tedy dle nuceného obtékání válcových těles.



Obr. 22 Proudění kolmo na svazek trubek

Volím:

$$D = 29 \text{ mm}; d = 25 \text{ mm}$$

$$S_1 = 90 \text{ mm}; S_2 = 45 \text{ mm}$$

$$c = 0,41$$

$$n = 0,6$$

$$\varepsilon_s = \left( \frac{S_1}{S_2} \right) \geq 2 \rightarrow \varepsilon_s = 1,12$$

**Součinitel tepelné vodivosti**

$$\lambda_{sp,275,3} = 0,0431 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (28)$$

dle přílohy č. 1

**Kinematická viskozita**

$$\nu_{sp,271,4} = 39,31 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (29)$$

dle přílohy č. 1

**Rychlost spalin dle měření**

$$w = 3,8 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (30)$$

$$\text{Pr}_{sp} = 0,664 \quad [-] \quad (31)$$

dle přílohy č. 1

**Reynoldsovo kritérium**

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu} \quad (32)$$

w	Rychlost spalin (30)	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
---	----------------------	----------------------------------

D	Vnější průměr trubky (27)	$[\text{m}]$
---	---------------------------	--------------

ν	Kinematická viskozita spalin (29)	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
---	-----------------------------------	------------------------------------

$$Re = \frac{3,8 \cdot 0,029}{39,31 \cdot 10^{-6}} = 2803,7 \quad [1]$$

### Nusseltovo kritérium

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^{0,33} \cdot \varepsilon_s \quad (33)$$

c	Konstanta závislá na druhu proudění	[1]
Re	Reynoldsovo kritérium (32)	[1]
Pr	Prantlovo kritérium (31)	[1]
$\varepsilon_s$	Poměrná rozteč trubek	[1]

$$Nu = 0,41 \cdot 2803,7^{0,6} \cdot 0,664^{0,33} \cdot 1,12 = 46,98 \quad [1]$$

### Součinitel přestupu tepla

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (34)$$

Nu	Nusseltovo kritérium (33)	[1]
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti (28)	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
D	Vnější průměr trubky (27)	[m]
$\alpha = \frac{46,98 \cdot 0,0431}{0,029} = 69,83$		$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

## 6.2.2 Tepelná bilance pro vodu

Hodnoty pro výpočet kritériálních rovnic jsou aplikovány ze střední teploty vody. Rychlost vody volím  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Střední teplota vody

$$t_{stř, H_2O} = \frac{t_{vstup, H_2O} + t_{výstup, H_2O}}{2} = \frac{10 + 60}{2} = 35 \quad [^{\circ}C] \quad (35)$$

### Vnitřní průměr trubky

$$d = 0,025 \quad [m] \quad (36)$$

### Kinematická viskozita vody

$$\nu = 7,3 \cdot 10^{-7} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (37)$$

### Prantlovo kritérium

$$Pr_{H_2O, 35} = 4,98 \quad [-] \quad (38)$$

dle přílohy č. 1

### Reynoldsovo kritérium

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu} \quad (39)$$

$\omega$	Rychlost vody	$[m \cdot s^{-1}]$
d	Vnitřní průměr trubky (36)	[m]
$\nu$	Kinematická viskozita vody (37)	$[m^2 \cdot s^{-1}]$

$$Re = \frac{1 \cdot 0,025}{7,3 \cdot 10^{-7}} = 34\,246,6 \quad [-]$$

### Nusseltovo kritérium

$$Nu = 0,0021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \quad (40)$$

Re Reynoldsovo kritérium (39) [-]

Pr Prantlovo kritérium (38) [-]

$$Nu = 0,0021 \cdot 34246,6^{0,8} \cdot 4,98^{0,43} = 177,71 \quad [-]$$

### Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (41)$$

Nu Nusseltovo kritérium (40) [-]

$\lambda$  Součinitel tepelné vodivosti (příloha č. 1) [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

d Vnitřní průměr trubky (36) [m]

$$\alpha_2 = \frac{177,71 \cdot 0,623}{0,025} = 4428,64 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

## 6.3 Výpočet základních parametrů výměníku

Jako materiál výměníku a trubek volím ocel  $\lambda_{ocel} = 43,031 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ .

### Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sum \delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (42)$$

$\alpha_1$  Součinitel přestupu tepla spalin (34) [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$\alpha_2$  Součinitel přestupu tepla vody (41) [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$\delta$  Tloušťka stěny trubky [m]

$\lambda$  Součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{69,83} + \frac{0,029 - 0,025}{43,031} + \frac{1}{4428,64}} = 68,31 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

### Teplosměnná plocha

$$S = \frac{Q_{vým}}{k \cdot \Delta t_{stř}} \quad (43)$$

$Q_{vým}$  Výkon výměníku (22) [W]

k Součinitel prostupu tepla (42) [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$\Delta t_{stř}$  Střední logaritmická teplota (25) [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$$S = \frac{103826}{68,31 \cdot 232,3} = 6,42 \quad [\text{m}^2]$$

### Délka trubky výměníku

$$l_t = \frac{S}{\pi \cdot D} \quad (44)$$

S Teplosměnná plocha výměníku (43) [m<sup>2</sup>]

D Vnější průměr trubky (27) [m]

$$l_t = \frac{6,42}{\pi \cdot 0,029} = 70,49 \quad [m]$$

### Délka trubky v ose

Volím:

R = 0,03 m

l = 0,4 m

n = 32

$$L_{trubka,osa} = 2 \cdot \left(R + \frac{D}{2}\right) + R \cdot \left(\frac{n}{2} - 1\right) \cdot \pi + \frac{n}{2} \cdot l \quad (45)$$

R Poloměr zaoblení trubky [m<sup>2</sup>]

D Vnější průměr trubky (27) [m]

n Odhadovaný počet trubek [1]

l Délka trubky [m]

$$L_{trubka,osa} = 2 \cdot \left(0,03 + \frac{0,029}{2}\right) + 0,03 \cdot \left(\frac{32}{2} - 1\right) \cdot \pi + \frac{32}{2} \cdot 0,4$$

$$L_{trubka,osa} = 7,903 \quad [m]$$

### Počet trubek, celkový

$$T_{trub,cel} = \frac{l_t}{L_{trub,osa}} \quad (46)$$

l<sub>t</sub> Délka trubky výměníku (46) [m]

L<sub>tr,osa</sub> Délka trubky v ose (47) [m]

$$T_{trub,cel} = \frac{70,49}{7,903} = 8,92 \rightarrow 9 \text{ trubek}$$

### Šířka trubek ve svazku

$$s_{trubka,svazek} = 2 \cdot \left(R + \frac{D}{2}\right) + l \quad (47)$$

R Poloměr zaoblení [m]

D Vnější průměr trubky (27) [m]

l Délka trubky [m]

$$s_{trubka,svazek} = 2 \cdot \left(0,03 + \frac{0,029}{2}\right) + 0,4 = 0,489 \quad [m]$$

### Šířka výměníku celková

$$s_c = s_{trubka,svazek} + D \quad (48)$$

S<sub>trub,svaz</sub> Šířka trubek ve svazku (47) [m]

D	Vnější průměr trubky (27)	[m]
	$s_c = 0,489 + 0,029 = 0,518$	[m]

### Výška výměníku po kraj trubky

$$h = D + \frac{S_1}{2} + S_1 \cdot \left( \frac{T_{trub,cel}}{2} - 1 \right) \quad (49)$$

D	Vnější průměr trubky (27)	[m]
$S_1$	Rozteč mezi trubkami	[m]
$T_{trub,cel}$	Počet trubek, celkový (46)	[1]

$$h = 0,029 + \frac{0,09}{2} + 0,09 \cdot \left( \frac{9}{2} - 1 \right) = 0,385 \rightarrow 0,433 \text{ [m]}$$

### Délka výměníku

$$l = S_2 + D + \left( \frac{n}{2} - 1 \right) \cdot 2 \cdot S_2 \quad (50)$$

D	Vnější průměr trubky (27)	[m]
$S_2$	Rozteč mezi trubkami	[m]
n	Odhadovaný počet trubek	[-]

$$l = 0,045 + 0,029 + \left( \frac{32}{2} - 1 \right) \cdot 2 \cdot 0,045 = 1,424 \text{ [m]}$$

### Délka výměníku bez přívodu spalín

$$l_{bez} = (4 \cdot D) + l \quad (51)$$

D	Vnější průměr trubky (27)	[m]
l	Délka výměníku (50)	[m]
	$l_{bez} = (4 \cdot 0,029) + 1,424 = 1,54$	[m]

### Délka výměníku s přívodem spalín

$$L_{celková} = l_{bez} + (2 \cdot l_{priruba}) \quad (52)$$

$l_{bez}$	Délka výměníku bez přívodu spalín (51)	[m]
$l_{priruba}$	Délka příruby, volím = 0,2 m	[m]
	$L_{celková} = 1,54 + (2 \cdot 0,2) = 1,94$	[m]

### Průřez pro průchod spalín

$$S_{spalin} = (h \cdot s_c) - (s_{trubka,svazek} \cdot D \cdot T_{trub,cel}) \quad (53)$$

h	Výška výměníku po kraj trubky (49)	[m]
$s_c$	Šířka výměníku celková (48)	[m]
$s_{trub,svazek}$	Šířka trubek ve svazku (47)	[m]
D	Vnější průměr trubky (27)	[m]
$T_{trub,cel}$	Počet trubek, celkový (46)	[m]

$$S_{spalin} = (0,433 \cdot 0,518) - (0,489 \cdot 0,029 \cdot 9)$$

$$S_{spalin} = 0,0731 \quad [m^2]$$

### Objem spalin při střední teplotě

$$V_{SP(SK)} = V_{SP(N)} \cdot \frac{273,15 + t_{stř,sp}}{237,15} \quad (54)$$

$$V_{sp(n)} \quad \text{Objem spalin normálních (16)} \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

$$t_{stř,sp} \quad \text{Střední teplota spalin (26)} \quad [^{\circ}C]$$

$$V_{SP(SK)} = 0,477 \cdot \frac{273,15 + 271,42}{237,15} = 0,958 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

### Skutečná rychlost spalin

$$w_{spalin,sk} = \frac{V_{sp(SK)}}{S_{spalin}} \quad (55)$$

$$V_{sp(SK)} \quad \text{Objem spalin skutečných (54)} \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

$$S_{spalin} \quad \text{Průřez pro průchod spalin (53)} \quad [m^2]$$

$$w_{spalin,sk} = \frac{0,958}{0,0731} = 13,1 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

### Skutečná rychlost vody

$$w_{H_2O,sk} = \frac{\frac{\dot{m}}{\rho}}{T_{trub,cel} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad (56)$$

$$\dot{m} \quad \text{Hmotnostní průtok vody (21)} \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

$$\rho \quad \text{Hustota vody} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

$$T_{trub,cel} \quad \text{Počet trubek, celkový} \quad [-]$$

$$d \quad \text{Vnitřní průměr trubky} \quad [m]$$

$$w_{H_2O,sk} = \frac{\frac{0,497}{994}}{9 \cdot \frac{\pi \cdot 0,025^2}{4}} = 0,1 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

## 7. Návrh akumulční nádrže

Akumulační nádrž je zařízení umístěné v topném okruhu. Má podobu tlakové nádoby uložené většinou nastojato (vertikálně). Je to zařízení sloužící k akumulaci a ohřevu teplé vody. Pro rovnoměrné rozložení tlaků v nádrži je půdorys akumulční nádrže kruhový. Do nádrže je vsazen spirálový trubkový výměník, ve kterém proudí topná voda, která ohřívá vodu v zásobníku. Ohřátá voda se odebírá v horní části. Přítok studené vody se nachází ve spodní části. Bývá upraven tak, aby nedošlo k promísení s vodou již ohřátou. K docílení co nejmenších tepelných ztrát skrze stěnu nádrže, je nutné jí tepelně izolovat. Jako izolační materiál lze použít, minerální vatu, polyuretanovou pěnu, molitan, kaučukovou izolaci a další materiály. Akumulační nádrž musí také obsahovat pojistný ventil na případný přetlak v nádobě a výpuště pro odkalení.

### Následný návrh dle spotřeby vody:

- spotřeba vody:  $1 \text{ [l·s}^{-1}\text{]} \text{ po dobu } 45 \text{ [min]} = 2\,700 \text{ [l·hod}^{-1}\text{]}$

Hmotností průtok vody v nádobě  $\dot{m}$  zaokrouhlím na  $3000 \text{ [l·hod}^{-1}\text{]}$ . Výsledná velikost akumulční nádrže bude tedy  $3000 \text{ [l]}$ .

### Výkon akumulční nádrže

Teplota vody na vstupu do akumulční nádrže:  $10 \text{ [}^\circ\text{C]}$

Požadovaná teplota vody na výstupu z nádrže:  $55 \text{ [}^\circ\text{C]}$

$$Q_{AN} = \dot{m} \cdot c_{p,H_2O} \cdot (t_{AN,výs} - t_{AN,vs}) \quad (57)$$

$\dot{m}$	hmotnostní průtok vody (spotřeba)	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$c_{p,H_2O}$	měrná tepelná kapacita vody (příloha č. 1)	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$t_{AN,výs}$	výstupní teplota užitkové vody	$[\text{}^\circ\text{C}]$
$t_{AN,vs}$	vstupní teplota užitkové vody	$[\text{}^\circ\text{C}]$

$$Q_{AN} = 0,834 \cdot 4,174 \cdot (55 - 10) = 156,81 \quad [\text{kW}]$$

### Potřebná doba ohřevu nádrže

$$t_{AN} = \frac{Q_{AN}}{Q_{vým}} \quad (58)$$

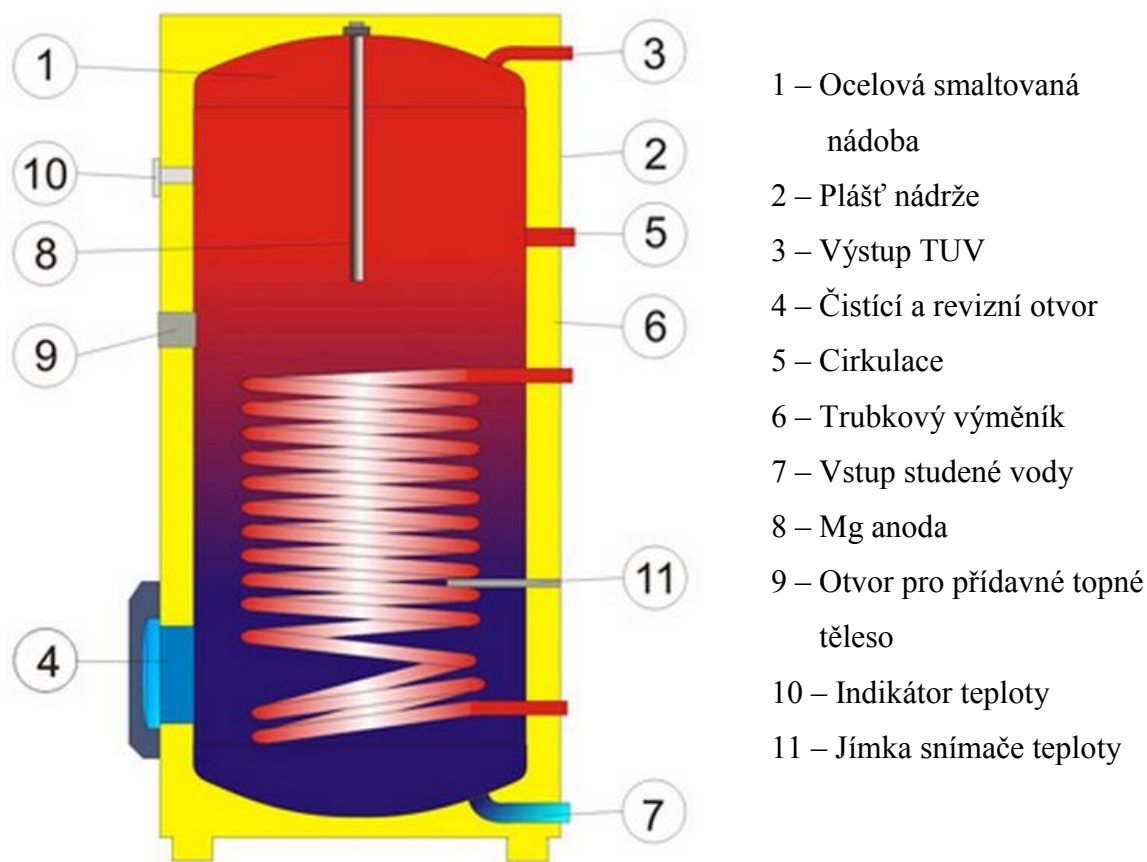
$Q_{AN}$  výkon akumulční nádrže (57)  $[\text{W}]$

$Q_{vým}$  výkon výměníku (22)  $[\text{W}]$

$$t_{AN} = \frac{156810}{103826} = 1,5 \quad [\text{hod}]$$



Z výpočtu tedy vyplývá, že potřebná doba ohřevu vody (na 55°C) v akumulární nádrži (3000 l) je 1,5 [hod].



Obr. 23 Akumulační nádrž s vloženým trubkovým výměníkem [18]

## 8. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout příslušný tepelný výměník pro využití odpadního tepla spalín z krokové pece pro ohřev TUV.

V teoretické části jsem popsal technologie a technické možnosti na využívání spalín a rozebral konstrukci krokové pece. Dále jsem zde uvedl rozčlenění a klasifikaci jednotlivých výměníků tepla a jejich použití v praxi.

V praktické části jsem provedl stechiometrický výpočet vzniklých spalín z krokové pece podle zadaných parametrů a také výpočet potřebné teplosměnné plochy výměníku. Na základě zjištěných údajů, informací a výpočtů jsem navrhl protiproudý vodotrubný spalínový výměník. Tento trubkový výměník bude vsazen pomocí bypassu do stávajícího spalínového traktu a zapojen do okruhu ohřevu TUV, včetně navržené akumulční nádrže, čerpadel, expanzních nádob, měřících, regulačních a uzavíracích armatur. V době saturace akumulční nádoby a malého odbytu TUV bude možno pomocí výměníku také vytápět administrativní budovu válcovny (především v zimních měsících) a ukládat teplo do dalších akumulčních nádrží.

Tato investice je z hlediska cenové návratnosti a využitelnosti druhotných zdrojů energie jasným úkazem snahy VÚHŽ a.s. o co nejúspornější a přitom nejefektivnější proces výroby a fungování společnosti.

## 9. Seznam použité literatury

- [1] DLOUHÝ, T.: *Výpočet kotlů a spalinových výměníků*. Praha: Česká technika, nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7
- [2] ČERNÝ, V., JANEBA, B., TEYSSLER, J.: *Parní kotle*. Praha 1: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1983.
- [3] KADLEC, Z.: *Průvodce sdílení tepla pro požární specialisty*. Ostrava: SPBI Spectrum, 2009. ISBN 978-80-7385-061-6
- [4] KADLEC, Z., BLAHOŽ, V.: *Základy sdílení tepla*. 2. vyd. Ostrava: SPBI Spectrum, 2000. ISBN 80-9020001-1-7
- [5] KYSELA, L.: *Využití druhotných zdrojů energie*. Poznámky k přednáškám Ostrava: SPBI Spectrum, 2008.
- [6] TRÍSKA, V., KITSCHKA, K.: *Krokovací zařízení průběžné ohřívací pece*. Ostrava: 1990. CS 26 8742 B1
- [7] JANEČEK, J.: *Krokovací zařízení pro přesun trubek v ohřívací peci*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2014.
- [8] BOLEK, R.: *Využití odpadního tepla z krokové pece*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010.
- [9] VÍT, T.: *Základy přenosu tepla a hmoty II*. Pomůcka pro přednášky a cvičení. Ostrava 1998.
- [10] Index od 361/vyuka. [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://fs1.vsb.cz/361/vyuka/>.
- [11] VUHŽ a.s. O VÚHŽ. [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.vuhz.cz/pages/cs/o-firme/o-vuhz/predstaveni-spolecnosti.php>.
- [12] TZB – info. Vytápění. [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://vytapieni.tzb-info.cz/>.
- [13] conVERTER. Fyzikální tabulky. [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/index.htm>.

- [14] Power Mag. *Air Preheater*. [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.powermag.com/air-preheater-seal-upgrades-renew-plant-efficiency/>.
- [15] Základy stavby procesních zařízení. *Spirálový výměník*. [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/pavel.hoffman/PREDMETY/ZSVZ/zsvz.htm>.
- [16] Collection Picture 2015. *Plate Heat Exchanger*. [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://ww5.b-id.com/81958-plate-heat-exchanger>.
- [17] BRHEL, R.: *Využití odpadního tepla z krokové pece*. Ostrava. VŠB – Technická univerzita Ostrava. 2014.
- [18] Družstevní závody Dražice – strojírna. *Ohřívače vody, bojlerů*: Sortiment. [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.dzd.cz/cs/ohrivace-vody-bojlery>.

## 10. Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Letecký snímek areálu VÚHŽ a.s. Dobrá [11] .....	15
Obr. 2 Schéma trojúhelníkového profilu trámu [6].....	16
Obr. 3 Žáruvzdorný trám [7] .....	16
Obr. 4 Kroková pec .....	17
Obr. 5 Spalinový kouřovod s ukázkou vsazení výměníku .....	17
Obr. 6 Schématická struktura rozdělení výměníků .....	18
Obr. 7 Protiproud.....	20
Obr. 8 Souproud .....	20
Obr. 9 Křížový tok .....	20
Obr. 10 Dvoutrubkový výměník [10].....	21
Obr. 11 Dvoutrubkový výměník „trubka v trubce“ [8].....	21
Obr. 12 Shell & Tube [10] .....	22
Obr. 13 Protiproud [10].....	22
Obr. 14 Protiproud i souproud [10].....	23
Obr. 15 Kotlový výměník [8].....	23
Obr. 16 Schéma proudění médií [10] .....	24
Obr. 17 Dekový výměník rozebíratelný [16] .....	25
Obr. 18 Řez spirálovým výměníkem [12, 15].....	25
Obr. 19 Žebrový výměník [10] .....	26
Obr. 20 Výměník Ljungström [14] .....	27
tab. 1 Koeficienty pro výpočet $c_p$ .....	31
tab. 2 Výpočet měrné tepelné kapacity spalin.....	32
Obr. 21 Průběh teplot v protiproudém výměníku .....	33
Obr. 22 Proudění kolmo na svazek trubek .....	34
Obr. 23 Akumulační nádrž s vloženým trubkovým výměníkem [18].....	41

## 11. Přílohy

Příloha č. 1:	Fyzikální vlastnosti spalin a vody
Příloha č. 2:	Náčrt spalínového výměníku
Výpočet v Excelu	Baron_Ondřej_Výpočet_v_Excelu_BP

## Příloha č. 1

Fyzikální vlastnosti spalín při tlaku 101 kPa

t °C	$\rho$ kg.m <sup>-3</sup>	$c_p$ kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	$\lambda.10^2$ W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	$a.10^8$ m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	$\eta.10^6$ Pa.s	$\nu.10^6$ m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,10	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,80	0,60
900	0,301	1,290	10,00	258,0	45,9	152,50	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,30	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,10	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,00	0,56

Fyzikální vlastnosti nasycené vody a nasycené vodní páry

t °C	$c_p$ (kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )		$\lambda.10^2$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )		$\eta.10^6$ (Pa.s)		Pr (-)	
	voda	pára	voda	pára	voda	pára	voda	pára
0	4,222		55,1		1788		13,67	
20	4,183		59,9		1004		7,02	
40	4,174		63,5		653,3		4,31	
60	4,179		65,9		469,9		2,98	
80	4,195		67,4		355,1		2,21	
100	4,22	2,135	68,3	2,37	282,5	11,97	1,75	1,08
120	4,25	2,206	68,6	2,59	237,4	12,85	1,47	1,09
140	4,287	2,315	68,5	2,79	201,1	13,54	1,26	1,12
160	4,346	2,479	68,3	3,01	173,6	14,32	1,1	1,18
180	4,417	2,709	67,4	3,27	153	15,11	1	1,25
200	4,505	3,023	66,3	3,55	136,4	15,99	0,93	1,36
220	4,614	3,408	64,5	3,9	124,6	16,87	0,89	1,47
240	4,756	3,881	62,8	4,29	114,8	17,76	0,87	1,61
260	4,949	4,486	60,5	4,8	105,9	18,84	0,87	1,75
280	5,23	5,234	57,4	5,49	98,1	19,91	0,9	1,9
300	5,736	6,28	54	6,27	91,2	21,29	0,97	2,13
320	6,574	8,206	50,6	7,51	85,3	22,86	1,11	2,5
340	8,165	12,85	45,7	9,3	77,5	25,21	1,39	3,35
360	13,984	23,03	39,5	12,79	66,7	29,14	2,35	5,23